

# La influencia de las solicitaciones dinámicas en la confortabilidad del transporte de viajeros

Por E. DE ALARCON ALVAREZ

Ingeniero de Caminos. Departamento de Instalaciones Fijas.  
Renfe, Subjefatura de Estudios y Obras Nuevas.

Un interesante problema con el que, a menudo, tropieza el transporte colectivo se refiere al grado de influencia que las solicitaciones dinámicas ejercen sobre el pasajero.

El estudio del tema se ha visto acelerado en los últimos tiempos por la necesidad de procurar unas condiciones de seguridad a los pilotos de cohetes y aviones supersónicos, así como por el intento de mejorar el diseño de los automóviles con vistas a disminuir la gravedad de los numerosos accidentes que se producen.

Aunque en el transporte por ferrocarril los efectos dinámicos son, salvo caso de accidente, de menor monta, es indudable que podemos beneficiarnos de la experiencia existente en los citados campos y mejorar aún más las condiciones de circulación. Como se comprende fácilmente, en los medios citados se trata más de prevenir los efectos de impactos y aceleraciones bruscas que los de las oscilaciones, contándose con la ventaja de que el usuario va colocado en la postura más adecuada para el movimiento. En el ferrocarril, por el contrario, existe la posibilidad de cualquier posición, incluida la de reposo en los coches-cama, y el efecto predominante es el de las oscilaciones del coche sobre sus resortes. Estas oscilaciones son tridimensionales y, por tanto, su efecto es muy complejo. Aunque sus orígenes son de todos conocidos, nos permitiremos recordar que se pueden producir por:

a) Irregularidades en la nivelación del camino, ya que la vía está muy lejos de presentar una configuración plana. En ocasiones se ha sustituido la trayectoria en estudio por una curva periódica con desnivelaciones de hasta 20 mm, en los casos de vías mal conservadas.

Aunque se trata de una simplificación, el estudio del movimiento puede hacerse suponiendo que el vagón se sustituye por un cuerpo de Kelvin con dos masas correspondientes (fig. 1ª) respectivamente a la suspendida sobre resortes y a la no suspendida. Todo el sistema se somete a un movimiento senoidal de amplitud igual a la que presentan las desnive-

laciones de la vía. La posibilidad de sustituir todas las ballestas por un solo muelle lineal ha sido justificada por Inglis (1) y la constante de muelles se puede deducir para el caso más desfavorable de máxima carga, en que se admite un descenso de topes de 12 cm (2). Respecto al amortiguador lineal, o cuerpo de Newton, sería más aproximado a la reali-

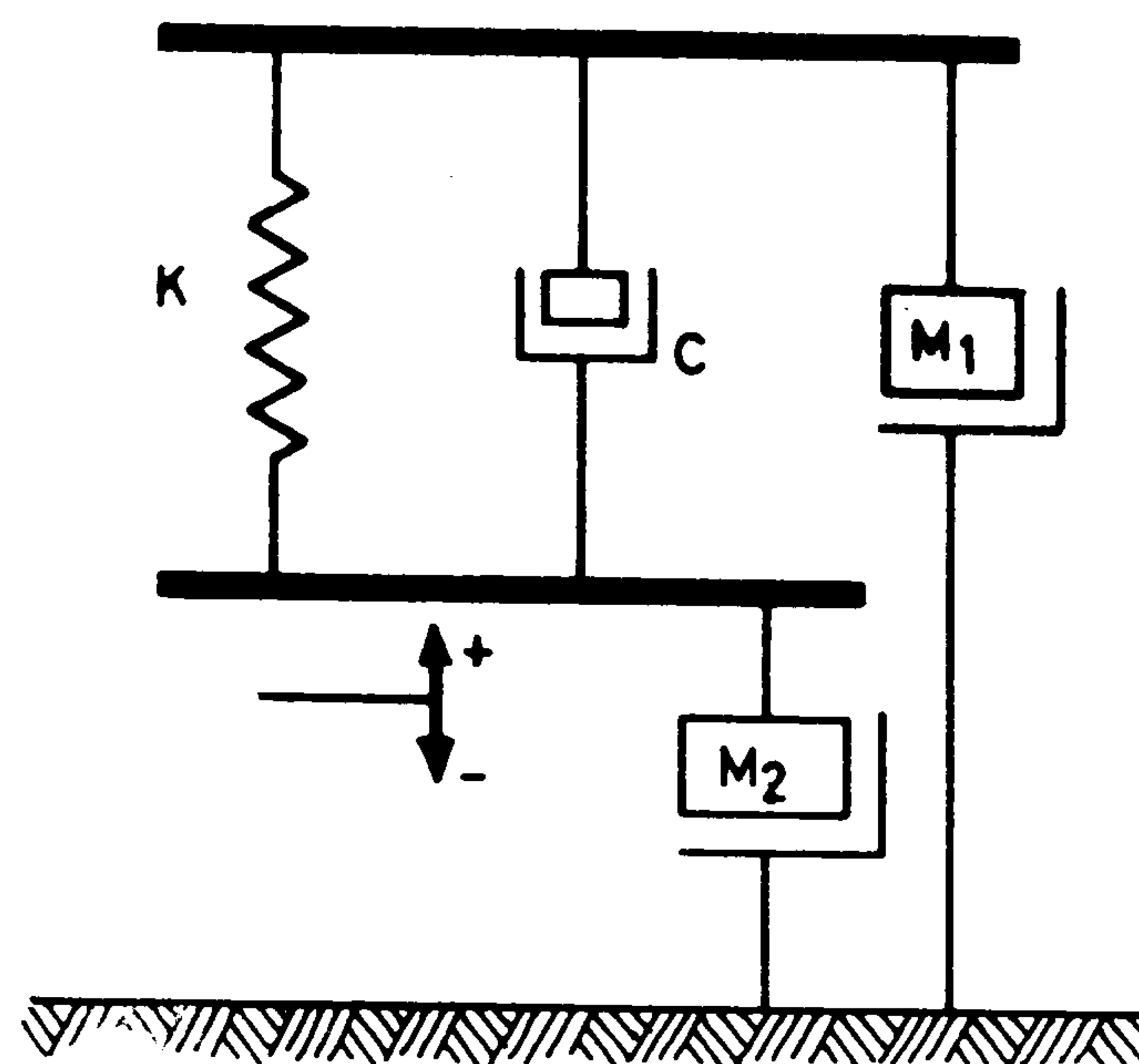


Fig. 1ª.

Simplificación para el estudio del movimiento sustituyendo el vagón por un cuerpo de Kelvin con dos masas, una suspendida sobre resortes y otra no.

dad sustituirlo por un cuerpo de Saint-Venant, pero en primera aproximación puede ser aceptado.

Para obtener el efecto sobre el pasajero, bastaría añadir el modelo mecánico del pasajero-tipo, del que luego hablaremos, o bien, "grosso modo", estudiar las aceleraciones, velocidades y desplazamientos del cuerpo superior y comprobar que se mantienen inferiores a los admisibles.

b) La presencia de discontinuidades. El efecto de las juntas de carril es un problema clásico, ya resuelto, para el que la mejor solución parece ser su supresión. La junta de carril se puede estudiar superponiendo los efectos de una cala y una desnivelación. En el primer caso Saint-Venant y Del-



puech (3) han llegado a soluciones satisfactorias. Para el segundo puede verse el tratamiento que le da García-Lomas en la obra ya citada (2).

Conviene recordar al respecto que la presencia de las juntas de carril es la causa principal de los excesos sobre la tensión estática que se aprecian en los puentes. Ello ha motivado la actual política de prescribir el uso de la vía soldada en los puentes de la Renfe.

c) Un efecto análogo se produce cuando se pasa desde el terreno a una obra de fábrica de poca flexibilidad. El tratamiento de estos "puntos duros" es semejante al anterior, aunque la presencia del balasto juega un importante papel amortiguador.

d) El efecto centrífugo vertical se presenta también en el paso por los puentes. El problema de las oscilaciones se ve entonces enormemente complicado por la influencia de las oscilaciones propias de la obra, afectadas a su vez por el estado de los aparatos de apoyo, las pilas, el terreno, etc. Estamos preparando un modelo mecánico en el que se materialicen todas estas influencias. De todos modos un tratamiento simplificado puede verse en las obras clásicas de Timoshenko (4), Bleich (5), etc.

e) Las traviesas mal bateadas presentan también puntos de impacto que se convertirán en oscilaciones a través del aislamiento del vagón.

f) El efecto centrífugo horizontal en las curvas, complicado con los movimientos de trepidación, galope, lazo, etc., influye decisivamente sobre las oscilaciones transversales a la vía. Su estudio es clásico y puede verse una interesante versión en la obra de Rocard (6), así como en el trabajo de M. A. Hacar (7).

g) Finalmente conviene hablar de los esfuerzos de frenado y arranque que afectan al viajero de modo un tanto diferente, pues son impactos súbitos y, por tanto, su influencia depende del tiempo de actuación.

Los efectos de las oscilaciones resultantes sobre el hombre se manifiestan afectando a los nervios cuando se trata de oscilaciones lentas (recuérdense los mareos en barcos y automóviles) y afectan no sólo al pasajero, sino también al conductor, que acusa una disminución de productividad y acaba afectado por enfermedades profesionales. Los efectos son de tres clases:

- 1) Interferencia con la actividad física.
- 2) Daños fisiológicos.
- 3) Cambios en el organismo y daños psicológicos.

Además de por la magnitud de las aceleraciones, vienen influidos por características subjetivas (grado de percepción, sorpresa, miedo...).

Ante estas realidades la bioingeniería estudia el cuerpo como mecanismo a través de ensayos sobre

animales y estudios de seres que han sufrido accidentes. Se parte, como se ve, de bases movedizas por la extrapolación necesaria en el primer caso y por desconocimiento de las condiciones iniciales en el segundo. Simultáneamente se realizan medidas cinemáticas en maniqués, pero su comportamiento es también incierto, pues, aparte de que sólo son útiles para bajas frecuencias, su pasividad difiere del comportamiento humano.

Ante esto se comprende que lo más útil sea realizar ensayos directos utilizando pequeñas solicitudes, de todos modos este procedimiento tampoco es exacto, pues sobre la máquina humana actúan condiciones fisiológicas y psicológicas difíciles de captar; así, por ejemplo, la elasticidad dinámica del tejido de una parte del cuerpo puede estar influida por la reacción psicológica al test en cuestión. Los ensayos se intentan completar pidiendo al individuo que explique las causas por las que ha solicitado la interrupción del experimento.

Como se ve, esto exige un estudio estadístico que nos permita prescindir del comportamiento individual y enunciar unas leyes generales.

En cuanto a la determinación de las características físicas, la fuerza aplicada se puede fijar exactamente y para los desplazamientos internos se pueden utilizar los rayos X, así como instrumentos ópticos y cinematográficos. A veces se usan medidores directos muy ligeros con el fin de que no perturben la zona estudiada.

Las medidas biológicas son muy variadas y se refieren a la presión sanguínea, el corazón, la respuesta galvánica de la piel, etc., incluyéndose estudios de músculos, huesos y ligamentos en cadáveres, cuyos resultados deben ser tratados con gran precaución para evitar extrapolaciones peligrosas.

El instrumento fundamental es la mesa de sacudidas, con oscilaciones longitudinales y transversales. Para estas últimas es muy importante la distribución longitudinal de las masas y los resultados difieren grandemente para cada postura, estando influidos también por la presencia de cinturones o dispositivos de protección.

En cualquier caso la carencia de rigidez del cuerpo humano como estructura portante hace preferible las medidas de aceleración a las de velocidades o desplazamientos.

De los numerosos estudios bioingenieriles realizados es interesante destacar a los que se refieren a la "respuesta del sistema tórax-abdomen", así como los de impedancias de sujetos en diversas posiciones en la mesa de sacudidas. Coermann (8) ha sugerido



la utilización del esquema mecánico del hombre medio que se adjunta (fig. 2ª), válido para frecuencias de menos de 100 Hz y, por tanto, muy adecuado a nuestro caso, aun con el inconveniente común a los maniquíes de su pasividad.

En general los esquemas que se manejan tienen

un grado de libertad y se utilizan con fuerzas senoidales, aunque, por supuesto, se trata de fenómenos no lineales, ya que el conjunto de músculos y tendones se comporta como un material elastómero. Se incluye a continuación una tabla de características del cuerpo humano (9).

	H U E S O S		
	Tejidos	Frescos	Secos
Densidad, g/cm³ .....	1-1,2	1,93-1,98	1,87
Módulo de Young, dina/cm² .....	7,5 . 10⁴	2,26 . 10¹¹	1,84 . 10¹¹
Módulo de Lamé, dina/cm² .....	2,6 . 10¹⁰	.....	1,3 . 10¹¹
Módulo de rigidez, dina/cm² .....	2,5 . 10⁴	.....	7,1 . 10¹⁰
Viscosidad, dina-seg/cm³ .....	1,5 . 10²	.....	.....
Velocidad del sonido, cm/seg .....	1,5 - 1,6 . 10⁵	3,36 . 10⁵	.....
Tensión normal, dina/cm² .....	—	9,75 . 10⁸	1,05 . 10⁹
Tensión cortante (paralela) .....	—	4,9 . 10⁸	.....
ID (perpendicular), dina/cm² .....	—	1,16 . 10⁹	5,55 . 10⁸

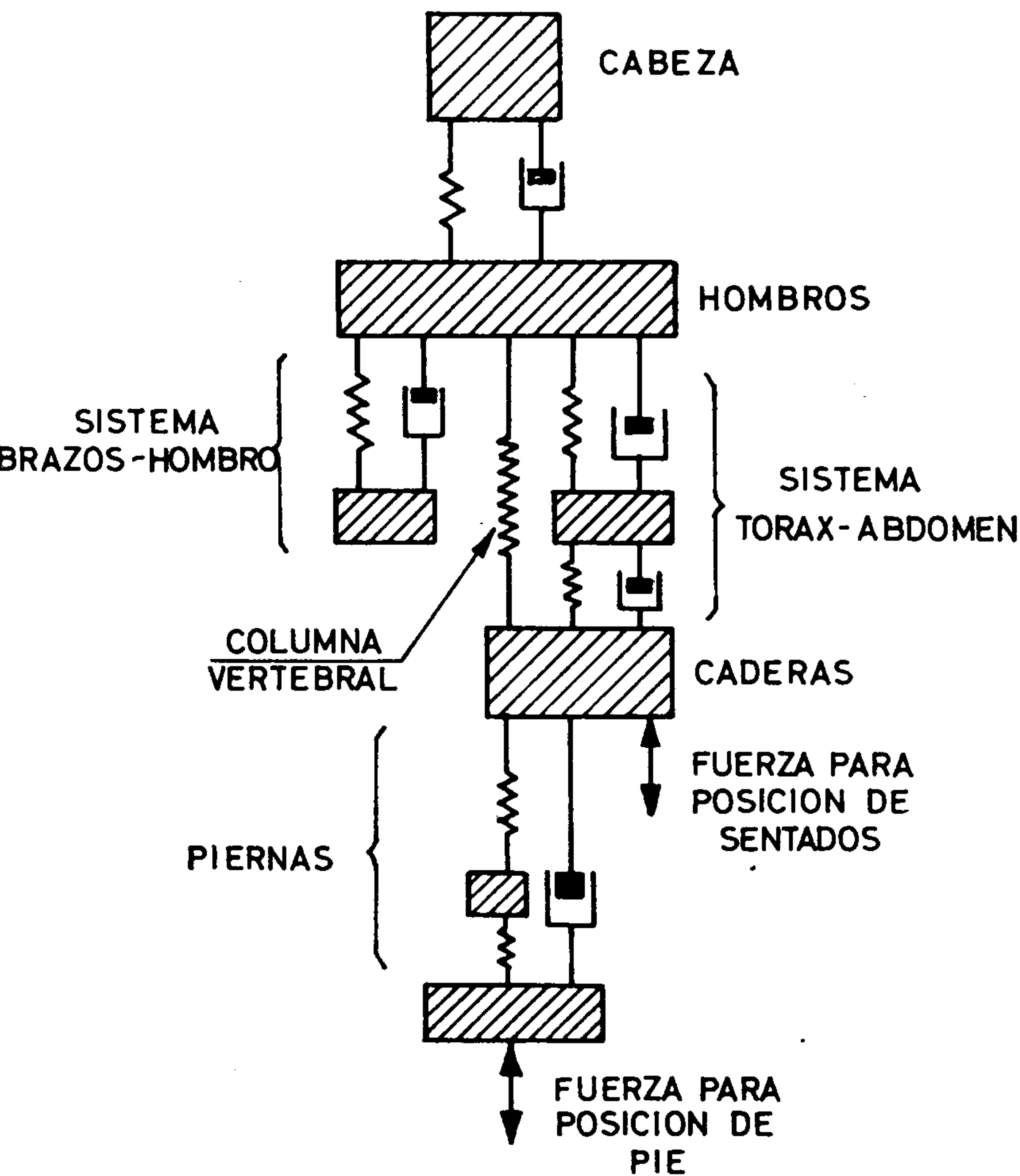


Fig. 2ª.

Esquema mecánico del hombre medio para el estudio de respuestas e impedancias en diversas posiciones sobre la mesa de sacudidas.

Los resultados obtenidos por Coermann permiten dibujar las curvas de la fig. 3ª, en las que se presenta la impedancia mecánica (ver Hixson (10)) de un hombre según su posición frente a oscilaciones longitudinales. Conviene observar que para frecuencias ba-

jas, el comportamiento es análogo al de una masa única.

Respecto al efecto sobre el cuerpo, parece ser que las resonancias que se observan para 4-6 Hz y 10-14 Hz, afectan principalmente a la 11ª vértebra torácica y a la 2ª lumbar. Sin embargo, alrededor de las 10 Hz, las amplitudes del cuerpo son menores que las inductoras.

Si el cuerpo está echado, las vibraciones tangenciales afectan principalmente entre los 3 y 3,5 Hz, y si se sujetan pies y hombros, la frecuencia de resonancia sube a 9 Hz. En este caso, como habrá podido comprobar cualquier usuario de coche-cama, el más importante subsistema es el formado por el tórax-

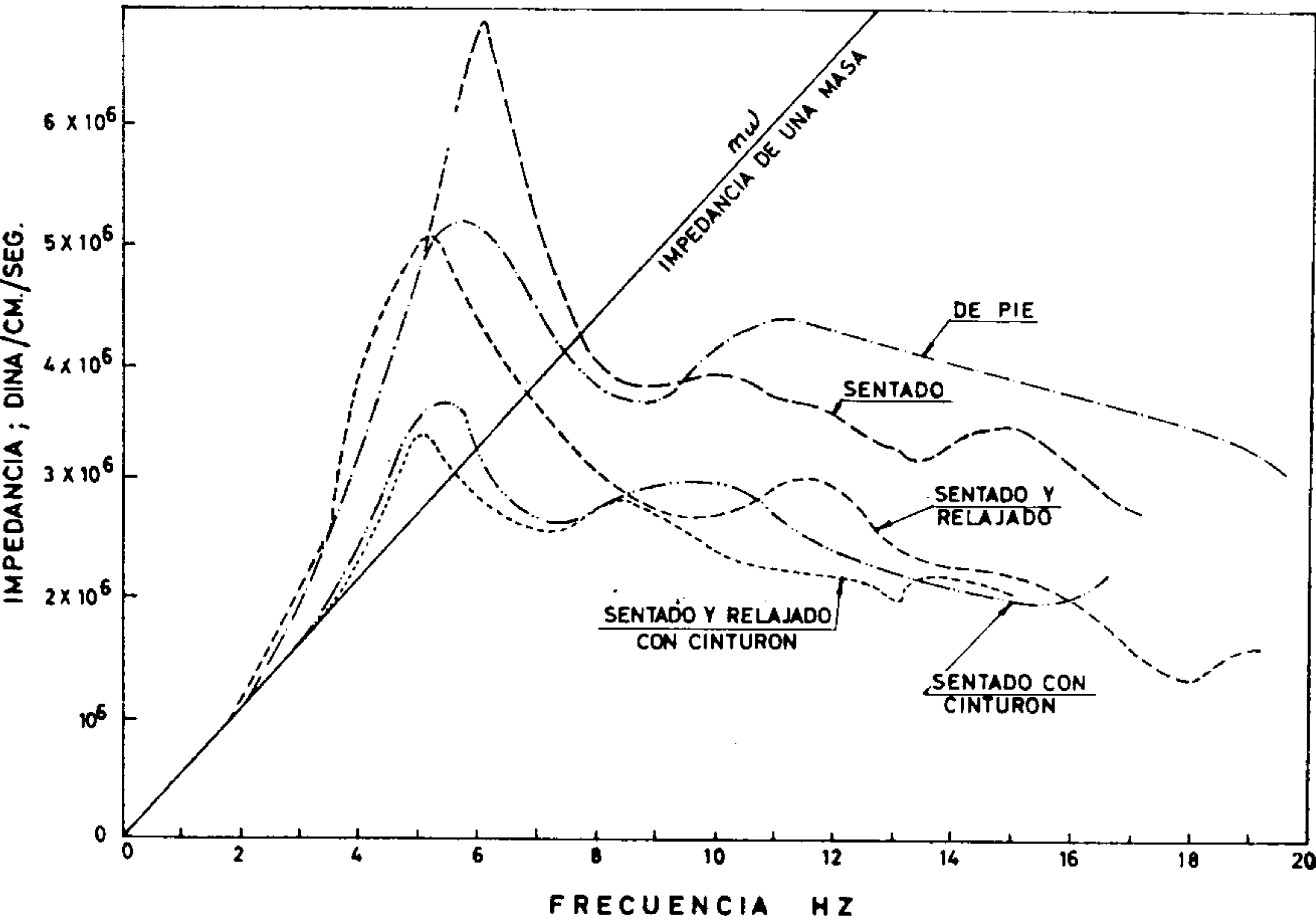


Fig. 3ª.

Impedancia mecánica de un hombre según su posición frente a oscilaciones longitudinales.



abdomen, ya que la poca rigidez del diafragma y la gran cantidad de aire contenido, que se acopla con el de la cavidad bucofaríngea, origina una gran movilidad de las vísceras. En la fig. 4ª se observa el

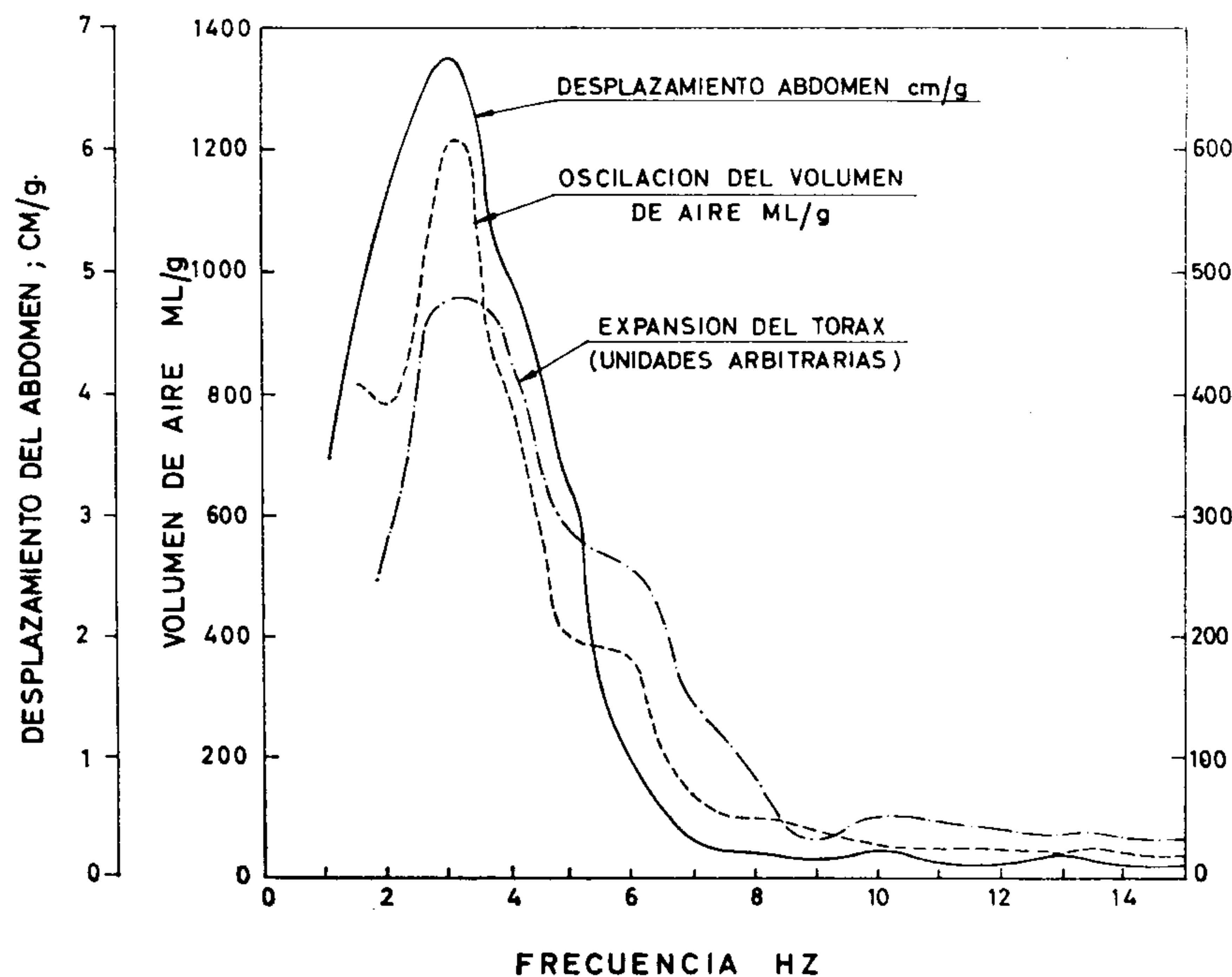


Fig. 4ª.

Vibraciones tangenciales en un cuerpo echado.

pico correspondiente al intervalo 3-3,5. Las unidades están expresadas en función de la aceleración  $g$  de la gravedad.

Según dijimos, para vibraciones normales al cuerpo, hay gran diferencia según la posición adoptada;

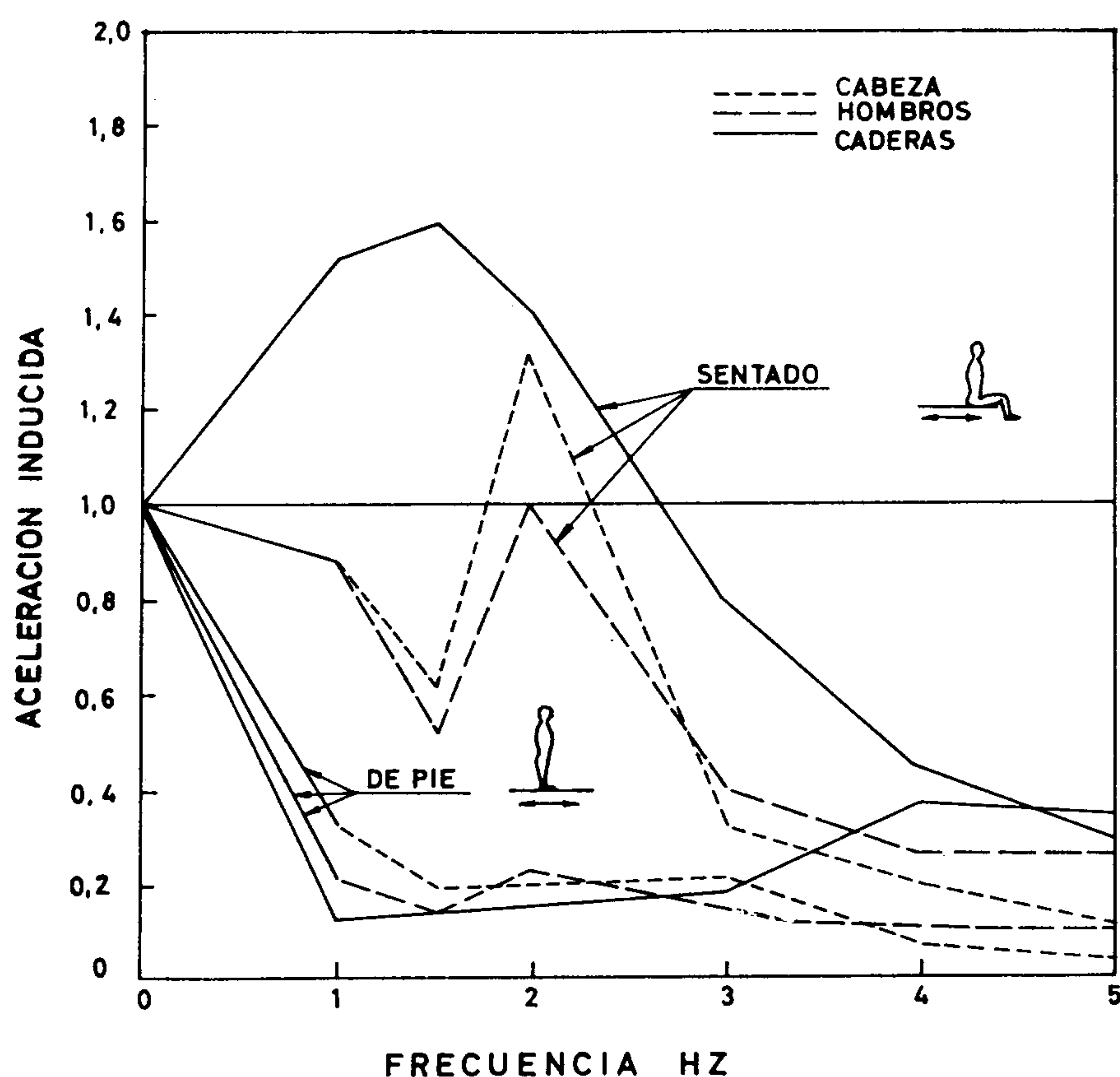


Fig. 5ª.

Transmisibilidad de vibraciones normales al cuerpo según la posición adoptada.

la fig. 5ª, tomada de Dieckmann (11), revela la transmisibilidad en cada caso.

Si interesa estudiar el comportamiento a frecuencias superiores a 100 Hz puede consultarse a Goldman (12).

Queda ahora por decir algo sobre la protección frente a las acciones dinámicas, así como los criterios de tolerancia frente a ellas.

Para la protección existen dos caminos: actuar sobre las causas y actuar sobre el usuario.

El primero aconseja eliminar los motivos enunciados al principio del artículo, es decir, mejorar las condiciones de la estructura portante; simultánea-

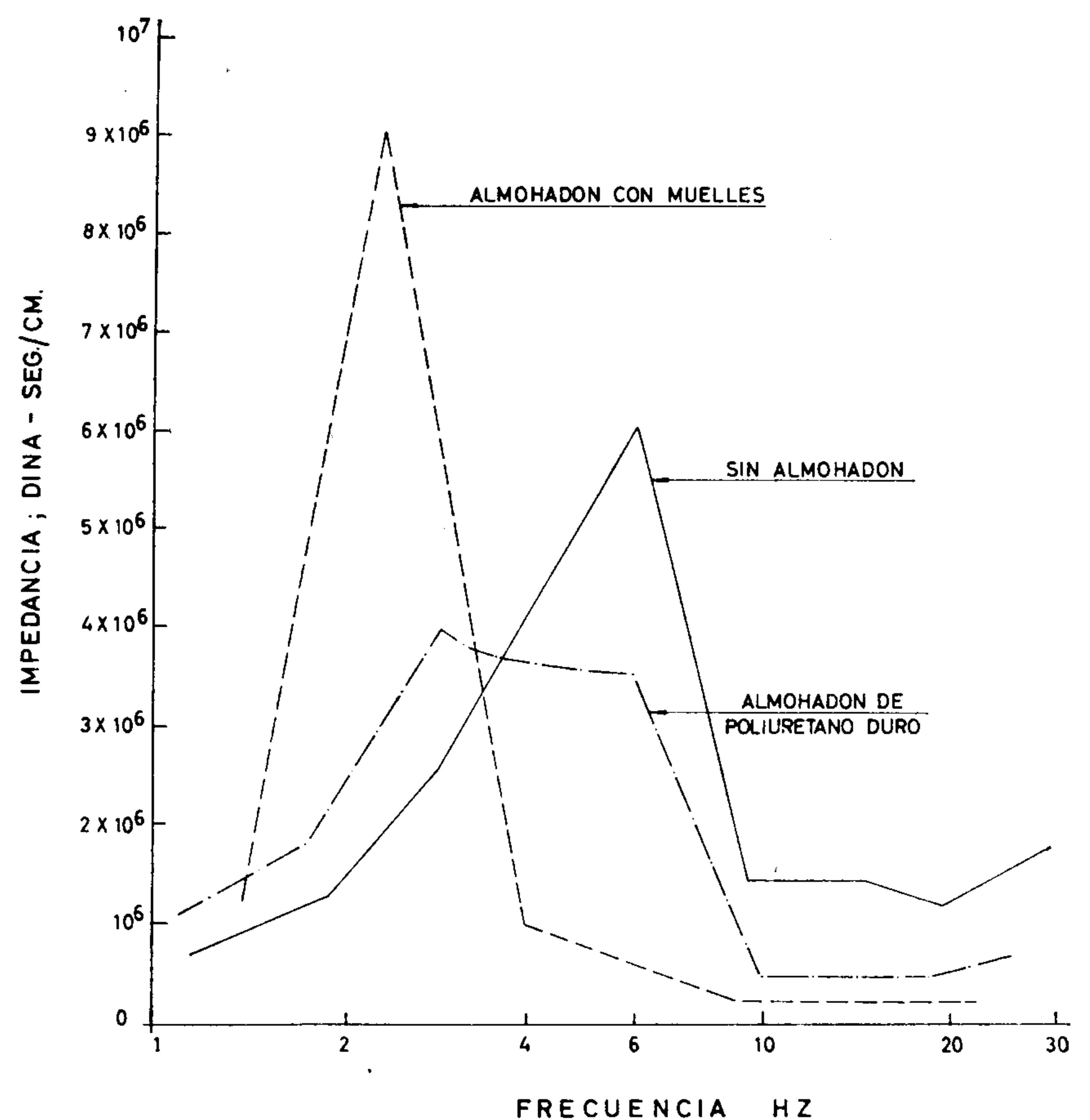


FIG. 5'

Fig. 6ª.

Importancia del tipo de almohadón en la impedancia mecánica de un hombre sentado y sometido a vibraciones longitudinales.

mente se puede actuar sobre el material móvil interponiendo aisladores que, en definitiva, se podrán reducir a una serie de cuerpos de Voigt.

La actuación sobre el usuario se realiza incrementando la resistencia mecánica mediante una postura adecuada, repartiendo la fuerza aplicada en una mayor superficie y procurando hacerla actuar sobre regiones óseas, utilizando cinturones, etc. En definitiva se trata de un problema de diseño análogo al que se plantea en la industria aeronáutica. Como ejemplo, la fig. 6ª representa la importancia del tipo de almohadón en la impedancia mecánica de un hom-



bre sentado y sometido a vibraciones longitudinales (Dieckmann).

Indicaremos, finalmente, algunos criterios de tolerancia para juzgar las vibraciones que se presenten.

Se suele definir la *intensidad de vibración* como

$$i = w^2/f = 8\pi^2 \text{ (cm}^2 \cdot \text{seg}^{-3}\text{)}$$

en la que

$w$  = aceleración en cm/seg<sup>2</sup>.

$f$  = frecuencia en Hz.

$N$  = potencia media durante un cuarto de período.

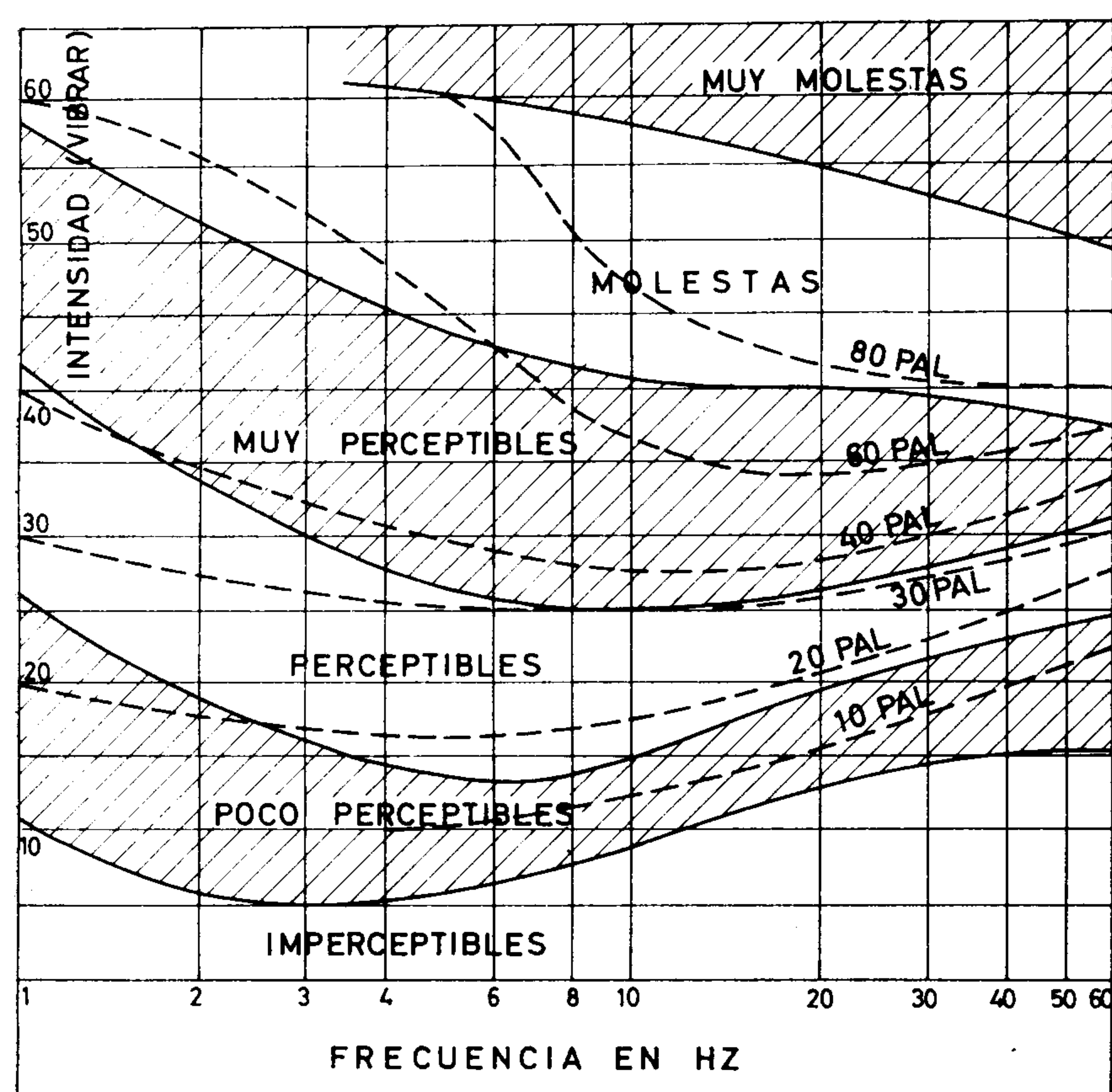


Fig. 7a.

Categorías de las percepciones según la frecuencia y la intensidad.

Pero en la práctica (13) la medida de la intensidad de vibración se expresa por

$$S = 10 \cdot \lg (i/i_s)$$

donde

$$i_s = 0,1 \text{ cm}^2 \cdot \text{seg}^{-3}$$

La unidad de medida de la intensidad  $S$  se llama "vibrario". Para medir el grado de percepción por el hombre, se utiliza el nivel de vibración en "palios", que se definen por

$$P = 10 \cdot \lg (I/I_0)$$

donde  $I$  es la intensidad eficaz de la vibración e  $I_0$  la intensidad al nivel de percepción. (Para  $f = 1$ ,  $S = P$ ) En la fig. 7ª se representa un cuadro de categorías según la frecuencia y la intensidad, y en la fig. 8ª el homólogo en función de  $g$ , elaborado por Goldman y otros.

J. I. Soliman ha analizado los múltiples resultados existentes en la bibliografía actual y ha resumido sus características en unos gráficos (ver (14)). Creemos más interesantes los resultados de Dieckmann expresados en la fig. 9ª en función de un *coeficiente de fatiga*.

Para cada frecuencia la curva determinante puede ser la de amplitudes, velocidades o aceleraciones.

Hasta 5 Hz la  $k$  son proporcionales a las velocidades y desplazamientos, permaneciendo constantes para las aceleraciones. Para frecuencias menores de 5 Hz son, pues, las aceleraciones las que indican el efecto de la vibración. Para  $5 < f < 40$  se utiliza el diagrama de las velocidades y para  $f$  mayor de 40 las amplitudes.

Los grados de fatiga que se establecen son los siguientes:

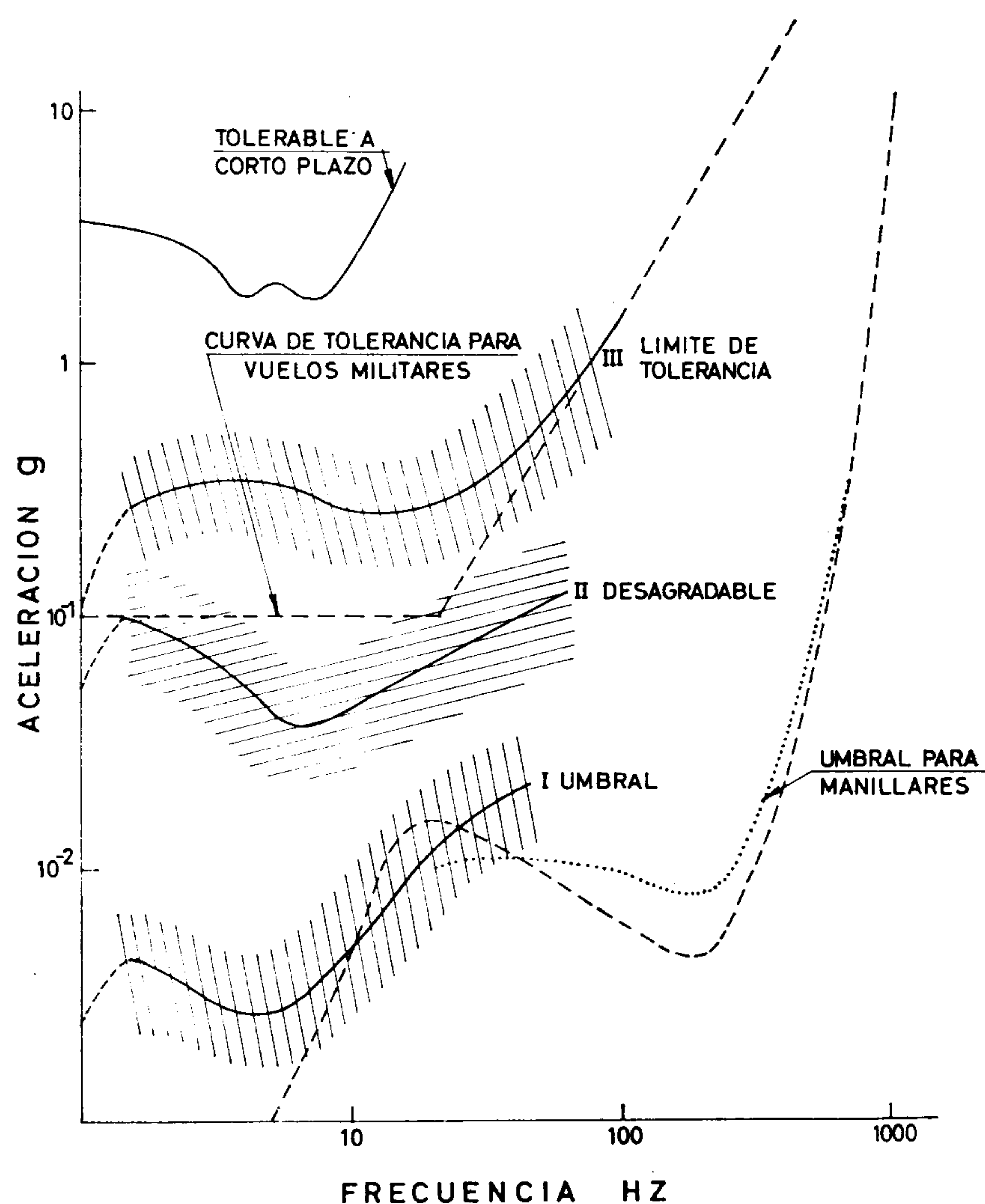


Fig. 8a.

Categorías de las percepciones en función de la aceleración de la gravedad.



K	Modo de percibir las vibraciones		Efectos
0,1	.....	Pequeñas ondas apenas perceptibles .	No se impide el trabajo.
0,1 - 0,3	.....	Perceptibles, poco molestas, soportables aunque duren	Idem.
0,3 - 1	.....	Fácilmente perceptibles, desagradables con el tiempo, pero soportables	Idem.
1 - 3	.....	Bastante potentes, desagradables, pero soportables	El trabajo queda impedido en cierta medida.
3 - 10	.....	Desagradables; insoportables si duran, tolerables como máximo durante una hora	Aunque impiden el trabajo pueden ser toleradas.
10 - 30	.....	Muy desagradables; soportables durante diez minutos como máximo	Apenas se puede trabajar.
30 - 100	.....	Extraordinariamente desagradables; soportables durante un minuto como máximo	No se puede trabajar.
Más de 100	.....	Insoportables	Idem.

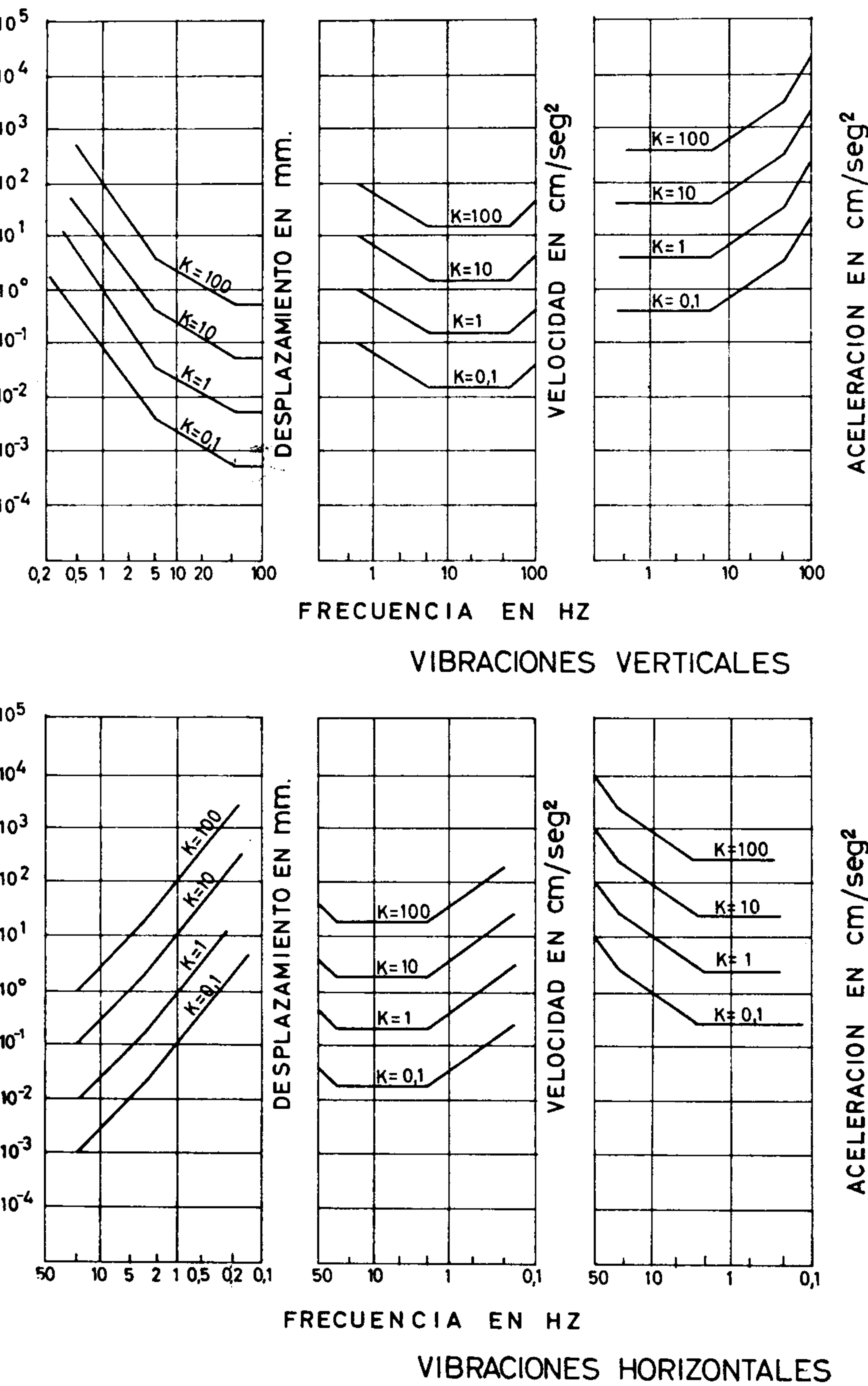


Fig. 9a.

Los coeficientes de fatiga para cada frecuencia según las amplitudes, velocidades o aceleraciones de las vibraciones verticales y horizontales.

Respecto a la tolerancia frente a impulsos repetidos verticales en función del tiempo, Reither y Meisner (15) han preparado la fig. 10, en la que quedan reflejados los diferentes niveles de percepción. El cuadro es aplicable, verbigratia, a suelos en las proximidades de forjas o maquinaria similar. La velocidad de la secuencia de los impactos se ve que no tiene demasiada importancia.

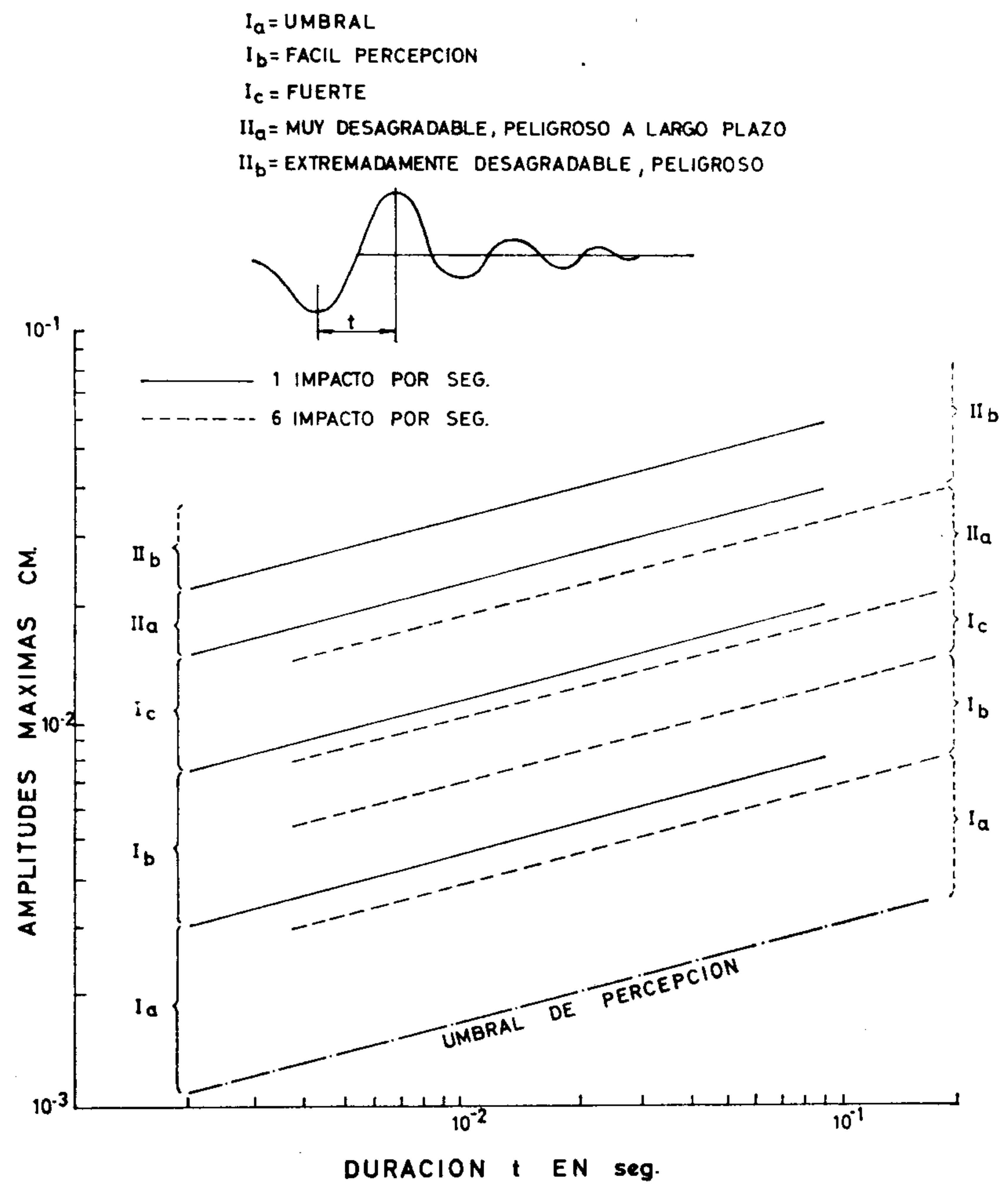


Fig. 10.

Tolerancia frente a impulsos verticales repetidos en función del tiempo.



Con todos estos datos creemos que se pueden analizar la mayoría de los casos que se encuentran en la práctica.

#### BIBLIOGRAFIA

En caso de necesitar ampliación se puede consultar la siguiente bibliografía especializada.

- (1) C. E. INGLIS: "A mathematical treatise on vibrations in railway bridges".
- (2) GARCÍA LOMAS: "Tratado de explotación de ferrocarriles".
- (3) DELPUECH: "Flexion dynamique et oscillations des ponts".
- (4) TIMOSHENKO: "Problemas de vibración en ingeniería".

- (5) BLEICH: "Theorie und berechnung der eisernen brücken".
- (6) Y. ROCARD: "La stabilite de route des locomotives".
- (7) M. A. HACAR: "Efectos dinámicos en los puentes".
- (8) COERMANN: "Aerospace Med." 31:443.
- (9) GOLDMAN y VON GIRKE: "Effects of shock and vibration on man".
- (10) HIXSON: "Mechanical impedance and mobility".
- (11) DIECKMANN: "Zur Einwirkung mechanischer Schwingungen auf den menschen".
- (12) GOLDMAN: "USNMRI = Rep. 1 NM 004001".
- (13) BUZDUGAN: "Mesurements des vibrations mechaniques".
- (14) COLIMAN: "Criteria for permissible levels of industrial vibrations".
- (15) REITHER y MEISTER: "Forsch. Gebiete. Ingenieurw".

La parte gráfica ha sido preparada con la colaboración de los señores García Hidalgo y García Galiano, Inspector principal y Agregado técnico del DIF, respectivamente.

## La Red Express Regional Parisiense

Por PIERRE WEIL

La Régie Autonome des Transports Parisiens transporta a cerca de dos mil millones de viajeros cada año. Cuatro millones de personas toman cada día el Metro, cuyos 200 km de líneas están servidos por 3 400 coches. Dos millones de viajeros son diariamente transportados por 3 700 autobuses, que circulan sobre cerca de 200 líneas de una longitud total de 1 800 kilómetros.

Sin embargo, la región parisiense está en plena mutación: su población actual de nueve millones de habitantes, repartidos sobre 12 000 km<sup>2</sup>, debe llegar a entre 13 y 15 millones a fines del siglo. La Régie, pues, debe hacer frente a una doble tarea: es preciso recuperar, en las redes que explota, los retrasos acumulados durante numerosos decenios. Debe diseñar al mismo tiempo e instalar las infraestructuras que hace indispensables el crecimiento continuo de la región.

#### UN TRANSPORTE A ESCALA DE LA REGIÓN URBANA

Como desde hace algunos años se le han concedido créditos, le Régie Autonome des Transports Parisiens ha emprendido ahora un vasto esfuerzo de modernización de sus equipos y de sus materiales; renueva también los métodos de explotación de sus redes de

autobús y férrea. Varias operaciones de extensión de líneas de metro (al Este, al Sudeste o al Noroeste) están en curso para adaptar la red férrea urbana a las transformaciones de París y sus cercanías.

La tarea principal de la Régie es, sin embargo, crear un sistema de transportes a la escala de la "región urbana de París". El "Esquema director de ordenación y de urbanismo", publicado en julio de 1965, ha planteado los principios de organización que prevén el mantenimiento de la personalidad de la Villa de París, la creación de ciudades alejadas de 20 a 40 km del centro de la capital y situadas a lo largo de "ejes preferenciales de urbanización y de transporte" paralelos al Sena y su afluente el Marne.

El desarrollo de la región urbana según estos ejes exige la instalación de una red de autopistas y de una red ferroviaria regional de gran movimiento.

La red ferroviaria regional se situará al lado de la red del Metro, que seguirá consagrado al servicio de París y de los pueblos cercanos, y de las líneas de las cercanías actuales de la SNCF, que por sus estaciones terminales apartadas sólo aseguran una difusión bastante limitada en París.

Para desempeñar eficazmente su papel en los nuevos ejes de urbanización, la red express regional deberá comprender líneas, de unos cincuenta kilómetros de largo, que atraviesen la capital y penetren